

北淮阳东段卢镇关群和佛子岭群地层含矿性 地球化学评价*

柴广路, 李双应**, 谢伟, 魏星, 程成

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要 卢镇关群和佛子岭群广泛分布于北淮阳成矿带内, 但是对其含矿性研究一直较为薄弱。文章通过对卢镇关群和佛子岭群成矿元素的地球化学特征研究, 评价地层含矿性。成矿元素富集系数(K)分析表明卢镇关群和佛子岭群各组中 Mo 元素均富集, W、Pb、Ag、Cu 元素也存在不同程度的富集, 存在潜在成矿可能; 成矿元素后期叠加强度(D)分析表明本区的 Mo、Ag、Cu 等元素存在不同程度的后期叠加作用; 成矿元素变异系数(CV)分析表明本区成矿元素具有一定的成矿潜力。对卢镇关群和佛子岭群成矿能力评序得出最优势矿种为 Mo 元素, 并且卢镇关群和佛子岭群是北淮阳钼矿的理想矿源层, 为区内钼矿提供了成矿物质。成矿元素与主微量元素的相关性分析表明 Cu、W、Ag、Pb、Zn 等元素受碎屑岩特征和氧化还原环境控制。

关键词 地球化学; 含矿性; 佛子岭群; 卢镇关群; 北淮阳

中图分类号: P595

文献标志码: A

Geochemical assessment of ore potentiality of Luzhenguan Group and Foziling Group in eastern part of north Huaiyang tectonic belt

CHAI GuangLu, LI ShuangYing, XIE Wei, WEI Xing and CHENG Cheng

(School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract

The Luzhenguan Group and Foziling Group are widely distributed in the north Huaiyang metallogenic belt, but their ore characteristics have not been studied. In this paper, the geochemical characteristics of ore-forming elements of Luzhenguan Group and Foziling Group were studied to evaluate the ore-bearing properties. The enrichment coefficient (K) of the ore-forming elements indicates that the Mo is enriched in the Luzhenguan Group and Foziling Group, and W, Pb, Ag and Cu are also enriched in different degrees. So there are potential mineralization possibilities in Luzhenguan Group and Foziling Group. The intensity of superposition coefficients (D) shows that Mo, Ag and Cu in the study area also have different degrees of later superimposition. However, the coefficients of variation (CV) of the ore-forming elements indicate that the ore-forming elements have some potential for mineralization. The comprehensive evaluation for mineralization capability of Luzhenguan Group and Foziling Group indicates that the dominant ore-forming element in the study area is Mo element. Luzhenguan Group and Foziling Group constituted the ideal source beds of molybdenum ore and provided ore-forming materials. Correlation coefficients between ore-forming elements and major elements and the characteristic indexes show that Cu, W, Ag,

* 本文得到中国地质调查局项目(编号: 12120113094300)、安徽省公益性地质工作项目(编号: 2014-g-9)和国家自然科学基金项目(编号: 41772098、41172097)联合资助

第一作者简介 柴广路, 男, 1989年生, 博士研究生, 古生物学与地层学专业。Email: chaiguanglu001@163.com

** 通讯作者 李双应, 男, 1956年生, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学和地层学研究。Email: lsysteven@126.com

收稿日期 2017-08-31; 改回日期 2018-02-14。赵海杰编辑。

Pb, Zn are controlled by clastic rock characteristics and redox environment.

Key words: geochemistry, ore-bearing Formation, Foziling Group, Luzhenguan Group, Beihuaiyang

武当-桐柏-大别成矿带位于华北板块和华南板块之间,是秦岭复合造山带的东延部分。区内已经探明湖北阴洞沟银金矿、庙垭稀土矿、大阜山金红石矿、破山银矿、老湾金矿等一批大型矿床,目前武当-桐柏-大别成矿带已经成为第20个国家级重点成矿带(彭三国等,2012;阴江宁等,2016)。特别是近年来相继发现安徽沙坪沟钼矿、河南千鹅冲钼矿、汤家坪钼矿(杨泽强,2007;李法岭,2011;Mao et al., 2011;张怀东等,2012),使其超越美国 Climax-Henderson 钼成矿带,成为世界上第一大钼成矿带(Li et al., 2012; Wang et al., 2014)。

研究区北淮阳成矿带位于武当-桐柏-大别成矿带的东段,卢镇关群和佛子岭群中发育东溪、南关岭、单龙寺、戴家河和汪家冲等金矿床,汞洞冲、银水寺等铅锌矿床和沙坪沟特大型钼矿床,是北淮阳金-银-铅锌-钼多金属成矿带中重要赋矿地层(彭智等,2005;邱军强,2012),但对其含矿性研究较为薄弱。本文通过对卢镇关群和佛子岭群中主要成矿元素进行研究,进而评价地层含矿性,以期对该区的找矿勘探工作做出贡献。

1 地质背景

桐柏-红安-大别造山带位于华北板块与华南板块之间,是形成于三叠纪的碰撞造山带(Xu et al., 1992; Li et al., 1993)。该造山带是秦岭造山带的东延部分,西与秦岭造山带隔南阳盆地相望,东被郟庐断裂带所切,北以六安-明港断裂为界,南以襄樊-广济断裂为界,总体呈“西窄东宽”的喇叭口状。造山带又以近南北向的大悟断裂和商麻城断裂为界,进一步细分为西部的桐柏造山带(TBO)、中部的红安造山带(HAO)和东部的大别造山带(DBO)。大别造山带自北向南依次被晓天-磨子潭断裂、五河-水吼断裂、花凉亭-弥陀断裂和太湖-马庙断裂分为北淮阳低温/低压绿片岩带(NHY)、北大别高温高压变质带(NDB)、中大别中温/超高压榴辉岩带(CDB)、南大别低温/超高压榴辉岩带(SDB)和宿松低温/高压蓝片岩带(SS)5部分(图1)(Zheng et al., 2003; Xu et al., 2012)。

北淮阳构造带是桐柏-大别造山带的一部分,相

当于造山带北缘的低温/低压绿片岩带(NHY)。其西起南阳盆地,东止于郟庐断裂带,北与华北陆块以六安-明港断裂为界,南以晓天-磨子潭断裂为界与北大别变质带相隔,东西绵延500 km,南北宽约50 km。传统上,以商麻断裂为界分为东段(安徽段)和西段(河南段)。自下而上可划分为4个构造层:①新元古界卢镇关群(苏家河群);②中古生界佛子岭群(信阳群);③晚古生界杨山群;④中生界陆相盆地沉积(彭智等,2005)。北淮阳东段卢镇关群和佛子岭群呈带状出露于金寨县船板冲、油店和霍山县小溪河、祥云寨、诸佛庵、潘家岭至舒城县七里河、河棚一带,其主要由一套绿片岩相的变质岩组成,基本属于总体有序、局部无序的变质地层(徐树桐等,2010;江来利等,2014),向西可与北淮阳西段的苏家河群和信阳群相对应。综合前人研究(安徽省地质矿产局区域地质调查队,1985;安徽省地质矿产局,1997)与实测剖面,卢镇关群和佛子岭群依岩性组合自下而上分为小溪河组、仙人冲组、祥云寨组、诸佛庵组和潘家岭组共5个地层单位(表1)。卢镇关岩群中斜长角闪岩类 $w(\text{Au})$ 达 10.07×10^{-9} ,高于地壳克拉克值的2~3倍,是东西溪、南关岭、戴家河、汪家冲等金矿床的重要赋矿围岩(梁超等,2011;王西荣等,2014);而佛子岭群是汞洞冲等铅锌矿和汤家坪等钼矿的赋矿地层(陆三明,2005;李法岭,2011),因此研究者认为卢镇关群和佛子岭群具有矿源层的特点(彭智,2004)。

区内岩浆活动频繁、岩浆岩多期次发育,形成时代包括新元古代(谢智等,2002)和中生代(张鹏,1998),其中以燕山期岩浆活动最为强烈,并与区内成矿作用关系最密切(刘晓强等,2017)。区内中生代侵入岩多在区域深大断裂交汇部位以复式岩体产出,岩性以石英闪长岩、石英二长闪长岩、花岗闪长岩、石英二长岩、二长花岗岩、碱长花岗岩和石英正长斑岩为主,形成时代为141~110 Ma(张红等,2011);火山岩受金寨断裂和晓天-磨子潭断裂控制而呈近东西向带状断续分布于霍山-舒城盆地和晓天盆地等次级火山构造单元中(杜建国等,1999),时代在134~127 Ma之间(夏群科等,2003;黄皓等,2012)。这些岩浆岩表现出从早到晚由钙碱性-高钾钙碱性向碱性岩转变的趋势

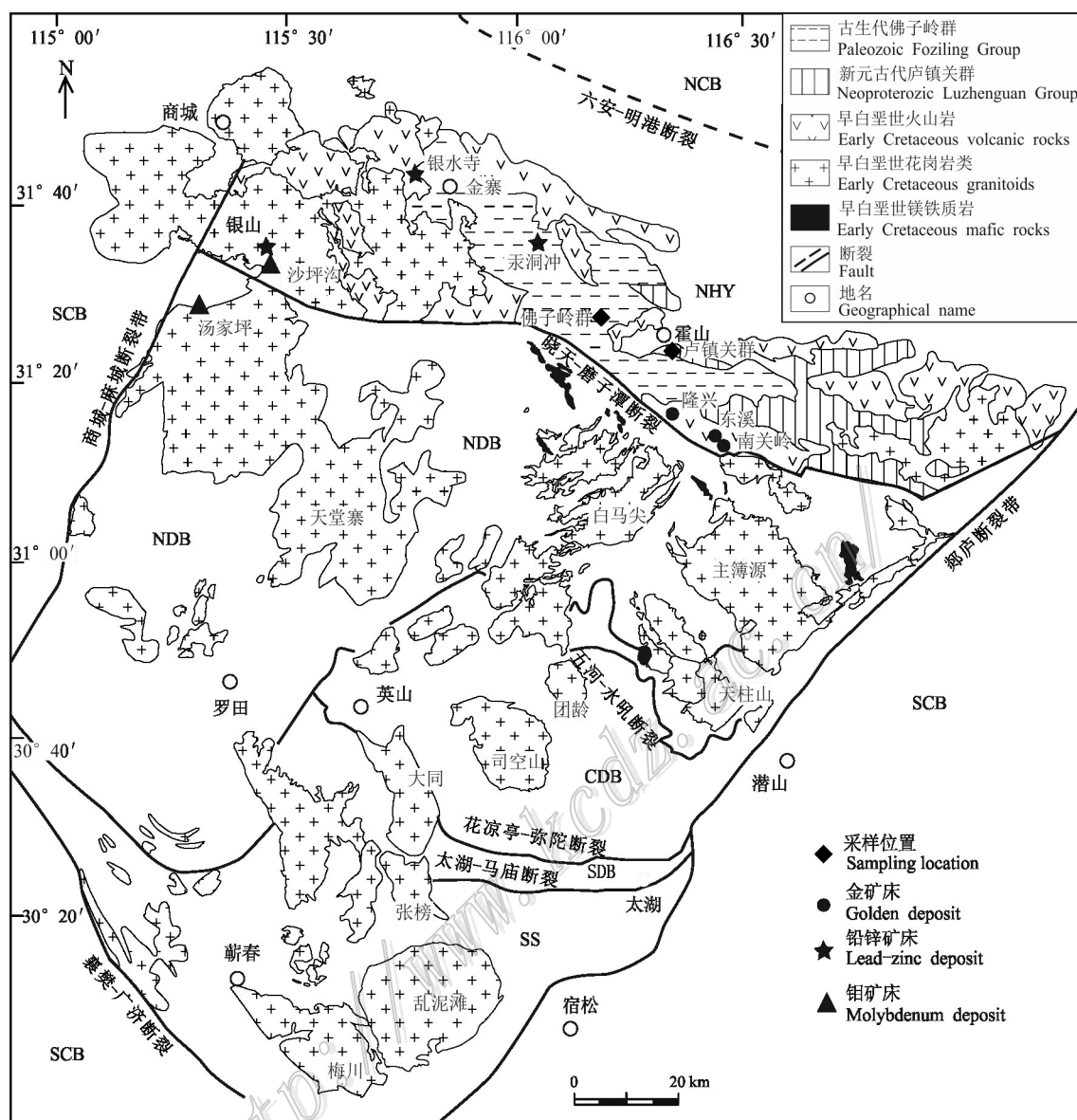


图 1 大别造山带地质简图(修改自 Dai et al., 2012; 刘晓强等, 2017)

NCB—华北板块; SCB—华南板块; NHY—北淮阳绿片岩带; NDB—北大别高温高压变质带;
CDB—中大别中温/超高压带; SDB—南大别低温/超高压榴辉岩带; SS—宿松蓝片岩带

Fig. 1 Simplified geological map of Dabie orogen (modified after Dai et al., 2012; Liu et al., 2017)

NCB—North China Block; SCB—South China Block; NHY—North Huaiyang greenschist zone; NDB—North Dabie high temperature/ultrahigh pressure metamorphic zone; CDB—Central Dabie medium temperature/ultrahigh pressure metamorphic zone; SDB—South Dabie low temperature/ultrahigh pressure eclogite zone; SS—Susong blueschist zone

(Fan et al., 2004), 可分为早、晚 2 期: 早期以大规模的喷发伴随深成作用为特征, 属高钾钙碱和钾玄岩系列, 是区内 Au、Ag 及 Pb、Zn 多金属矿化的主要时期; 晚期岩浆活动以深成岩为主, 属碱性系列, 是区内 Mo 矿化最主要的时期(王根节等, 2010)。

2 样品采集测试

2.1 样品采集

为保证测试的准确性, 本文在岩相学和地层学研究的基础上, 从野外剖面采集的地球化学标本中

表1 卢镇关群和佛子岭群地层特征

Table 1 The characteristics of the stratigraphy of Luzhenguan Group and Foziling Group

地层时代	群	组	主要岩性特征	厚度/m
早志留世至 晚泥盆世	佛子岭群	潘家岭组	浅灰、青灰色厚层二云石英片岩、黑云石英片岩、条带状含黑云石英片岩、条带状含榴石黑云石英片岩	> 3804.54
		诸佛庵组	浅灰色-深灰色薄层二云石英片岩、白云石英片岩夹薄层石英岩	1736.01
		祥云寨组	灰白色中薄层变质石英砂岩、石英片岩及含绢云(或白云)石英片岩	544.98
新元古代	卢镇关群	仙人冲组	灰白色中-厚层白云质大理岩夹绢云石英片岩	> 140.75
		小溪河组	浅灰-深灰色厚层混合岩化黑云钾长(二长)片麻岩、黑云(白云)石英片岩和深灰色混合岩化斜长角闪岩	> 2600

等间距选取新鲜、无脉的代表性样品作为成矿元素测试样品,并且保证样品不跨越地质界线。本次研究在霍山县南牛角冲剖面采集卢镇关群小溪河组样品5件,在霍山县西仙人冲剖面采集卢镇关群仙人冲组样品8件,在霍山县西落儿岭-十八盘剖面采集佛子岭群祥云寨组样品7件、诸佛庵组样品12件、潘家岭组样品13件。采样位置见图1。

2.2 样品测试

地球化学分析测试在澳实矿物实验室集团澳实分析检测(广州)有限公司完成,分析了Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、Mo、Fe共8种元素。其中Au元素采用Au-AA23方法(火试金法和原子吸收定量)测试;其他成矿元素采用ME-MS61方法(四酸消解,质谱/光谱仪综合定量)测试,分析流程为:将待测样品在65℃左右低温干燥24h,之后破碎,经多次手工缩分出200g均匀样品在振动研磨机上研磨至200目,采用美国PerkinElmer公司生产的Elan9000型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测定,微量元素分析精度和准确度优于10%。详细测试结果列于表2。

3 地球化学特征

3.1 成矿元素丰度

元素丰度是重要的地球化学基础数据,决定了各种地球化学作用背景,也是衡量元素分散变化程度的标尺。黎彤等(1990)指出元素丰度和资源储量之间存在线性相关关系。Vistelius(1960)研究表明地壳中元素的概率分布可分为2类:第一类是地球化学过程中某一特定阶段分布是正态分布;第二类是地球化学过程中若干个阶段的混合产物的分布是正偏的偏态分布。就沉积地层而言,某种沉积岩中元素丰度应指该沉积岩在沉积成岩过程中元素的初

始平均含量,而不包括成岩后地质作用(包括成矿作用)叠加改造引起的元素含量富集亏损。基于地球化学和统计学规律,将元素中位数作为地层中元素丰度值可以在很大程度上消除后期作用的影响,代表了沉积成岩时元素的背景含量;而元素平均值受后期叠加作用的影响,代表了原始沉积信息与后期叠加信息的复合元素含量(唐元骏等,1987;张松林等,1995)。表3和表4分别列出了各地层成矿元素含量变化范围和丰度,图2显示了卢镇关群和佛子岭群主要成矿元素克拉克值分布模式。

3.2 成矿元素数据处理

由于后期矿化叠加作用会引起的少数特异元素含量会对其他数据的相关系数产生扭曲。为确保数据处理研究一方面要挖掘地层初始沉积信息,另一方面也提取后期成矿作用信息,因此,文章采取如下数据处理方法:

(1) 含量数据不作任何处理直接参与计算。这样反映了地层沉积初始信息和后期矿化信息的复合信息,因此如果与后期矿化叠加有关的一种成矿元素含量特别高,而其他元素与其不相关,则聚类分析结果反映原始沉积和后期矿化的叠加信息。

(2) 对含量数据作正态转换,使转换后的数据尽可能服从正态分布,然后再参与计算。这种处理方法能在很大程度上抑制后期地质作用(特别是成矿作用信息)的影响,使其尽可能地反映岩层沉积时的原始信息。

2组数据分析结果的综合使元素间的相关关系得到了合理反映。潘家岭组成矿元素数据未经处理前,Ag与Pb的相关系数为0.79,Pb与Fe、Mn相关系数为0.26、0.33,而经过正态转换后,Ag与Pb的相关系数降为0.53,Pb与Fe、Mn相关系数升为0.70、0.79。对于给定的 $\alpha=0.01$ 的置信水平,相关系数临

表 2 卢镇关群和佛子岭群成矿元素测试结果

Table 2 Ore-forming elements of Luzhenguan Group and Foziling Group

地层	样品号	$w(B)/\%$							
		Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	Fe
小溪河组	TD-001	<0.005	0.16	13.3	15.8	78.0	0.20	0.69	4.49
	TD-002	<0.005	0.06	11.7	8.20	92.0	0.40	0.74	6.53
	TD-003	<0.005	0.05	1.80	21.5	70.0	0.40	1.35	4.10
	TD-010	<0.005	0.10	187	8.50	11.0	0.60	5.44	1.52
	TD-012	<0.005	0.06	1.60	6.30	52.0	0.60	4.55	3.58
仙人冲组	TD-024	<0.005	0.10	3.20	4.20	15.0	0.40	2.56	0.42
	TD-116	<0.005	0.03	4.80	4.90	25.0	0.70	0.46	1.27
	TD-117	<0.005	0.02	3.80	3.80	10.0	0.60	1.33	0.69
	TD-120	<0.005	0.01	0.90	4.00	18.0	0.20	0.47	0.15
	TD-121	<0.005	<0.01	2.60	2.30	7.00	0.50	1.08	0.25
	TD-122	<0.005	<0.01	1.40	3.70	7.00	0.20	1.21	0.14
	TD-123	<0.005	<0.01	1.50	3.40	4.00	0.20	0.33	0.28
	TD-126	<0.005	<0.01	0.80	2.90	4.00	0.10	1.66	0.09
祥云寨组	TD-013	*	0.04	2.70	11.2	16.0	0.50	0.70	0.86
	TD-014	<0.005	0.04	10.0	16.6	29.0	1.30	0.92	1.85
	TD-015	*	0.03	2.30	2.90	3.00	0.90	0.96	0.97
	TD-017	*	0.01	1.40	1.00	<2.00	0.30	1.29	0.60
	TD-019	*	0.04	5.90	12.1	18.0	0.70	1.22	1.05
	TD-020	0.005	0.08	5.10	15.8	78.0	1.50	2.90	3.27
	TD-021	<0.005	0.02	43.2	5.40	13.0	2.40	0.38	1.79
	TD-033	*	0.03	3.20	15.7	48.0	1.50	0.63	2.74
诸佛庵组	TD-035	0.005	0.02	1.50	9.30	51.0	1.50	0.57	2.97
	TD-036	*	0.03	5.20	5.90	20.0	0.70	0.79	1.27
	TD-039	<0.005	0.02	6.40	8.30	20.0	0.40	0.69	1.02
	TD-041	*	0.04	18.7	11.9	54.0	1.50	0.51	3.30
	TD-043	0.008	0.02	1.30	13.7	53.0	0.60	0.53	3.36
	TD-046	*	0.02	6.70	8.30	46.0	2.00	0.61	2.48
	TD-049	<0.005	0.05	23.9	21.2	67.0	1.60	2.66	2.60
	TD-053	*	0.04	6.10	9.40	59.0	1.20	0.63	2.83
	TD-058	0.006	0.03	6.30	22.5	90.0	2.80	0.42	4.34
	TD-061	<0.005	0.02	10.2	5.50	6.00	0.70	0.55	0.86
	TD-066	<0.005	0.03	3.40	9.50	27.0	1.40	1.74	1.73
潘家岭组	TD-007	<0.005	0.09	6.10	11.9	27.0	0.50	1.45	1.67
	TD-025	<0.005	0.02	2.50	4.00	16.0	3.90	1.35	1.48
	TD-027	*	0.02	3.50	3.20	2.00	1.10	1.73	0.71
	TD-029	*	0.04	1.20	2.10	3.00	0.20	3.88	0.28
	TD-030	<0.005	0.02	2.10	14.6	78.0	1.40	0.59	3.19
	TD-071	<0.005	0.07	26.6	22.3	42.0	0.30	0.79	2.31
	TD-075	0.015	0.02	1.40	0.70	<2.00	0.10	1.04	0.77
	TD-078	<0.005	0.03	1.60	24.8	73.0	2.60	0.62	4.27
	TD-081	*	0.02	9.10	18.1	38.0	0.30	0.88	2.58
	TD-083	<0.005	0.04	1.00	17.4	66.0	0.20	0.85	3.45
	TD-087	*	0.03	4.60	14.2	40.0	1.50	0.87	2.40
	TD-088	<0.005	0.17	23.1	54.0	81.0	1.90	2.69	2.27
	TD-089	<0.005	0.04	38.3	7.30	84.0	0.80	1.38	6.13

注：“<”小于检测限；“*”为未测得数据。

表3 卢镇关群和佛子岭群成矿元素含量变化表及区域背景值
Table 3 The content of ore forming elements of Luzhenguan Group and Foziling Group and regional background values

元素	小溪河组	仙人冲组	祥云寨组	诸佛庵组	潘家岭组	秦岭-大别背景值
$w(B)/10^{-6}$						
Au	< 0.005	< 0.005	≤0.005	≤0.008	≤0.015	0.0021
Ag	0.05~0.16	0.01~0.10	0.01~0.08	0.02~0.05	0.02~0.17	0.06
Cu	1.60~187	0.80~4.80	1.40~43.2	1.30~23.9	1.00~38.3	12.5
Pb	6.30~21.5	2.30~4.90	1.00~16.6	5.50~22.5	0.70~54.0	19.1
Zn	11.0~92.0	4.00~25.0	2.00~78.0	6.00~90.0	2.00~84.0	51.6
W	0.20~0.60	0.10~0.70	0.30~2.40	0.40~2.80	0.10~3.90	0.50
Mo	0.69~5.44	0.33~2.56	0.38~2.90	0.42~2.66	0.59~3.88	0.74
$w(B)/\%$						
Fe	1.52~6.53	0.09~1.27	0.60~3.27	0.86~4.34	0.28~6.13	2.39

注:秦岭-大别背景值引自赵华荣等,2015。

界值为0.68。上述结果表明,在岩层沉积时,Ag与Pb是分离的,在岩层经历后期矿化作用后,才得以迭加共生;而Pb与Fe在岩层沉积时相关性显著,但在岩层遭受矿化后并不共生。这一结果反映了后期矿化作用对岩层初始成矿元素组合的叠加改造作用。

4 地层含矿性评价

20世纪70年代,Favorskaya和Tomson首次提出地质异常概念(Gorelov, 1982),其后赵鹏大等(1993)将地质异常定义为在结构、构造或成因序次上与周围环境有着明显差异的地质体或地质体组合,并认为矿产资源分布与地质异常存在密切联系。基于地质异常成矿理论,中国学者发展了独特特色的数学地质方法,如地质统计学、多重分形奇异值等异常提取方法(赵鹏大等,2009; Cheng et al., 2009;

Zuo et al., 2009)。这些地质异常找矿方法对包括非传统矿产资源在内的各类矿产资源进行了有效预测,并且也对油气、页岩气等能源资源勘探开发起到推动作用(赵鹏大等,2012)。然而这些方法都是基于勘查地球化学数据和GIS定量成矿预测的二维地球化学数据处理方案,而对于一维的地层含矿性适用性较差,故本文采用成矿元素富集系数(K)、后期叠加强度(D)和变异系数(CV)等地质异常指数对卢镇关群和佛子岭群地层含矿性进行评价。表6列出了卢镇关群和佛子岭群中成矿元素的地质异常指数。

4.1 成矿元素的相对富集与贫化

地层中成矿元素含量的高低是决定地层能否提供成矿物质来源的重要因素。一般来说,地层中高背景的元素对成矿是有利的(张松林等,1995)。地层中某一元素的“富集系数”定义为地层中该元素的

表4 卢镇关群和佛子岭群成矿元素的丰度(中位数)
Table 4 The abundances of ore-forming elements of Luzhenguan Group and Foziling Group (median)

元素	小溪河组	仙人冲组	祥云寨组	诸佛庵组	潘家岭组	大陆地壳平均值
$w(B)/10^{-6}$						
Au	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.00121
Ag	0.06	0.01	0.04	0.03	0.03	0.052
Cu	11.7	2.10	5.10	6.20	3.50	24.0
Pb	8.50	3.75	11.2	9.45	14.2	12.6
Zn	70.0	8.50	16.0	49.5	40.0	73.0
W	0.40	0.30	0.90	1.45	0.80	0.69
Mo	1.35	1.15	0.96	0.62	1.04	0.65
$w(B)/\%$						
Fe	4.10	0.27	1.05	2.67	2.31	5.13

注:大陆地壳平均值据Germ(Geochemical Earth Reference Model),1998。

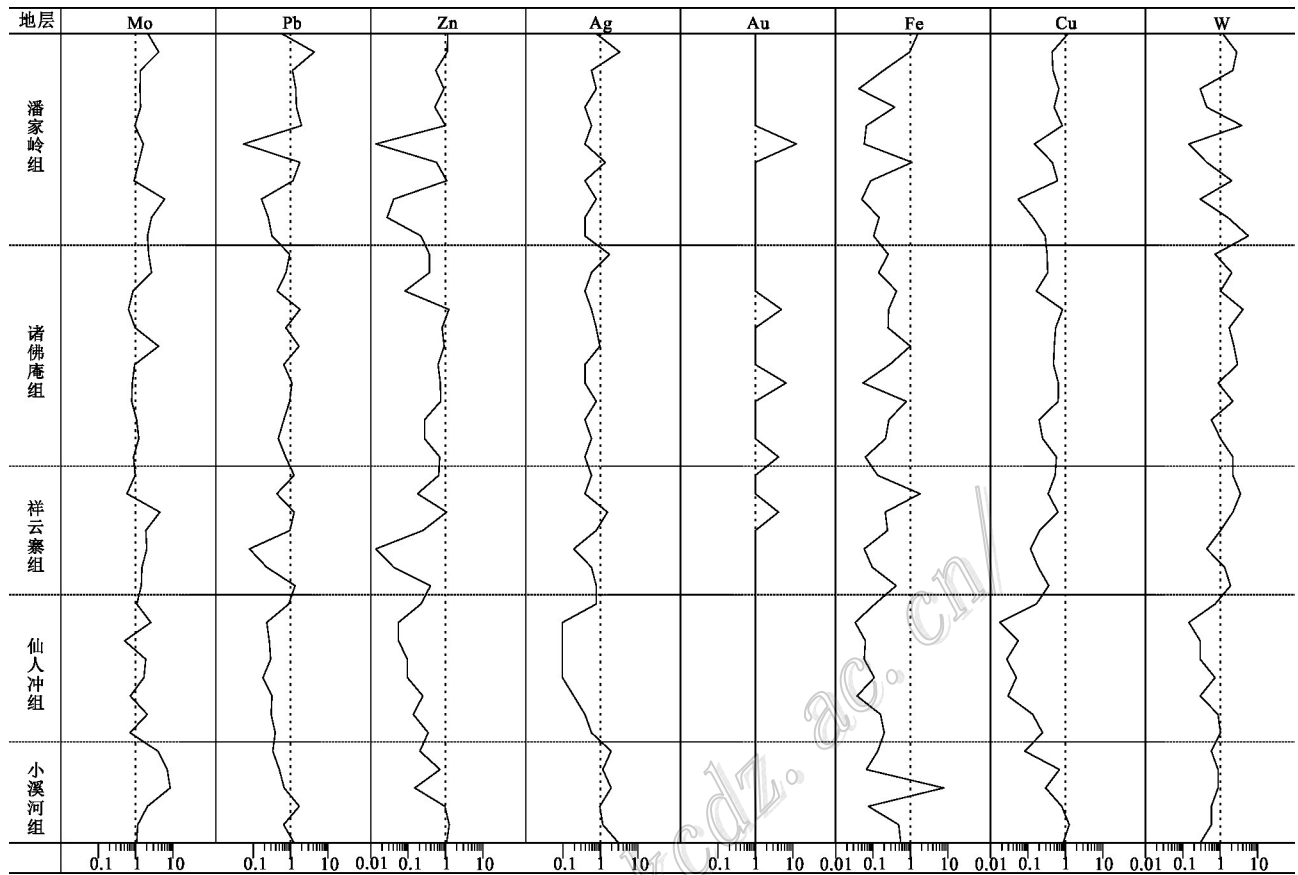


图 2 卢镇关群和佛子岭群成矿元素克拉克值分布模式(横坐标为克拉克值)

Fig. 2 Distribution pattern of Clarke values of ore-forming elements in Luzhenguang Group and Foziling Group (X-coordinate is Clark value)

丰度与地壳中该元素的丰度的比值。富集系数(K)可以判断地层中元素的相对富集与贫化程度: $K \geq 1.5$ 说明元素在地层中浓集程度强烈,成矿前景较大; $1.0 \leq K < 1.5$ 说明元富集程度不明显,成矿潜力一般; $K < 1.0$ 说明元素是区域贫化元素。通过对卢镇关群和佛子岭群中成矿元素富集系数(K)的分析(表 7),卢镇关群和佛子岭群各组中 Mo 均富集,成矿潜

力巨大,可与区内钨矿相印证。此外,卢镇关群和佛子岭群各组中 W、Pb、Ag、Cu 也存在不同程度的富集,存在潜在成矿可能。

4.2 成矿元素的后期叠加强度

成矿元素经过强烈的后期矿化高度叠加后,成矿可能性会大大增加。叠加系数是反映矿化叠加强度的重要参数。“叠加强度系数(D)”为地层中该元

表 5 潘家岭组成矿元素相关系数表

Table 5 Correlation coefficients of ore-forming elements of Panjialing Formation

原始	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	Fe	正态	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	Fe
Ag	1.00							Ag	1.00						
Cu	0.46	1.00						Cu	0.53	1.00					
Pb	0.79	0.35	1.00					Pb	0.53	0.45	1.00				
Zn	0.34	0.48	0.65	1.00				Zn	0.38	0.43	0.89	1.00			
W	0.00	-0.13	0.18	0.16	1.00			W	0.00	0.15	0.40	0.42	1.00		
Mo	0.40	0.05	0.04	-0.31	-0.10	1.00		Mo	0.41	0.11	-0.30	-0.42	-0.08	1.00	
Fe	-0.01	0.54	0.26	0.86	0.10	-0.46	1.00	Fe	0.13	0.42	0.70	0.88	0.36	-0.65	1.00

表6 卢镇关群和佛子岭群成矿元素的富集指数(K)、后期叠加强度(D)和变异系数(CV)

Table 6 The enrichment coefficients (K), overlapping intensity (D) and variation coefficients (CV) of ore-forming elements of Luzhenguan Group and Foziling Group

地层	地质异常指数	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	Fe
小溪河组	K1	1.15	0.49	0.67	0.96	0.58	2.08	0.80
	K2	1.65	1.79	0.96	0.83	0.64	3.93	0.79
	D	1.43	3.67	1.42	0.87	1.10	1.89	0.99
	CV	0.53	1.87	0.53	0.52	0.38	0.89	0.45
仙人冲组	K1	0.14	0.09	0.30	0.12	0.43	1.76	0.05
	K2	0.43	0.10	0.29	0.15	0.53	1.75	0.08
	D	3.00	1.16	0.97	1.32	1.21	0.99	1.55
	CV	1.45	0.62	0.22	0.66	0.61	0.66	0.97
祥云寨组	K1	0.77	0.21	0.89	0.22	1.30	1.48	0.20
	K2	0.71	0.42	0.74	0.31	1.57	1.84	0.29
	D	0.93	1.98	0.83	1.41	1.21	1.25	1.41
	CV	0.60	1.48	0.67	1.16	0.66	0.68	0.62
诸佛庵组	K1	0.58	0.26	0.75	0.68	2.10	0.95	0.52
	K2	0.56	0.32	0.93	0.62	1.92	1.32	0.48
	D	0.97	1.25	1.25	0.91	0.91	1.39	0.92
	CV	0.34	0.89	0.47	0.52	0.51	0.77	0.43
潘家岭组	K1	0.58	0.15	1.13	0.55	1.16	1.60	0.45
	K2	0.90	0.39	1.19	0.58	1.65	2.14	0.47
	D	1.56	2.66	1.05	1.06	1.42	1.34	1.05
	CV	0.91	1.30	0.94	0.74	0.99	0.67	0.66

注:K1为富集指数(中位数);K2为富集指数(平均值)。

素的包含后期叠加因素在内的元素含量平均值与地层中该元素丰度的比值。这一系数反映了元素遭受后期作用叠加的强度,也能反映作为成矿介质的地层接受矿化与进一步富集成矿的可能性与程度,因此,其可以用来指示各种成矿元素可能的赋矿层位。叠加系数 $D \geq 1.5$, 说明元素具极强的后期叠加作用,成矿可能性较大;而 D 介于 $1.0 \sim 1.5$ 之间时,表明元素具强叠加和一定的成矿能力。卢镇关群和佛子岭群中成矿元素后期作用叠加强度系数(D)的分析(表8)表明卢镇关群和佛子岭群各地层均经历了不同程度的后期成矿作用叠加。除仙人冲组外,各地层单元中Mo元素均存在不同程度上的后期叠加。Cu元素显著叠加层位包括小溪河组、祥云寨组、潘家岭组;Ag元素显著叠加层位包括仙人冲组、潘家岭组。总体而言,卢镇关群和佛子岭群的Mo、Ag、Cu等元素存在不同程度的后期叠加作用。

表7 卢镇关群和佛子岭群相对富集和亏损的成矿元素

Table 7 The enrichment and dilution of ore-forming elements of Luzhenguan Group and Foziling Group

浓集系数 (中位数)	$K \geq 1.5$	$1.0 \leq K < 1.5$	$K < 1.0$
小溪河组	Mo	Ag	Cu、Pb、Zn、W、Fe
仙人冲组	Mo		Ag、Cu、Pb、Zn、W、Fe
祥云寨组		W、Mo	Ag、Cu、Pb、Zn、Fe
诸佛庵组	W		Ag、Cu、Pb、Zn、Mo、Fe
潘家岭组	Mo	W、Pb	Ag、Cu、Zn、Fe
浓集系数 (平均值)	$K > 1.5$	$1.0 < K \leq 1.5$	$K < 1.0$
小溪河组	Ag、Cu、Mo		Pb、Zn、W、Fe
仙人冲组	Mo		Ag、Cu、Pb、Zn、W、Fe
祥云寨组	W、Mo		Ag、Cu、Pb、Zn、Fe
诸佛庵组	W	Mo	Ag、Cu、Pb、Zn、Fe
潘家岭组	W、Mo	Pb	Ag、Cu、Zn、Fe

4.3 成矿元素的变化性

地层中某一元素含量的“变异系数”(CV)定义为地层中该元素含量的标准差与地层中该元素含量的平均值的比值。该系数是反映元素变化性的重要指标,可用于说明元素后期叠加作用的不均匀程度。变异系数值越大,元素含量的变化就越大,说明后期叠加作用越不均匀,对成矿越有利。 $CV \geq 1.5$ 说明元素具有极强的变异,成矿潜力大; $0.5 \leq CV < 1.5$ 说明元素具有一定的变异以及一定的成矿潜力。卢镇关群和佛子岭群中成矿元素变异系数(CV)的分析(表9)表明卢镇关群和佛子岭群多数成矿元素具有一定的变异以及一定的成矿潜力。仅小溪河组Cu元素的变异系数大于1.5表明元素具有极强的变异,成矿潜力大。这反映了卢镇关群和佛子岭群总体受后期成矿作用不均匀叠加程度较弱。

表8 卢镇关群和佛子岭群成矿元素的后期作用叠加强度系数(D)分组

Table 8 The relative levels of coefficients of overlapping intensity of ore-forming elements of Luzhenguan Group and Foziling Group

叠加强度系数(D)	$D \geq 1.5$	$1.0 \leq D < 1.5$	$D < 1.0$
小溪河组	Cu、Mo	Ag、Pb、W	Zn、Fe
仙人冲组	Ag、Fe	Cu、Zn、W	Pb、Mo
祥云寨组	Cu	Zn、W、Mo、Fe	Ag、Pb
诸佛庵组		Cu、Pb、Mo	Ag、Zn、W、Fe
潘家岭组	Ag、Cu	Pb、Zn、W、Mo、Fe	

表 9 卢镇关群和佛子岭群成矿元素的变异系数(CV)相对水平
Table 9 The relative levels of variation coefficients (CV) of the ore-forming elements of Luzhenguan

Group and Foziling Group			
变异系数 CV	> 1.5	0.5 < CV < 1.5	CV < 0.5
小溪河组	Cu	Ag, Pb, Zn, Mo	W, Fe
仙人冲组		Ag, Cu, Zn, W, Mo, Fe	Pb
祥云寨组		Ag, Cu, Pb, Zn, W, Mo, Fe	
诸佛庵组		Cu, Zn, W, Mo	Ag, Pb, Fe
潘家岭组		Ag, Cu, Pb, Zn, W, Mo, Fe	

4.4 地层的含矿性评价

根据前人的研究资料,成矿元素经过强烈的后期叠加后,成矿可能性会大大增加。如果某地层中成矿元素丰度高,又经强烈的后期叠加,有可能反映矿为原始沉积、后期叠加成因;如果某地层中成矿元素丰度较低,但是后期叠加强烈,有可能反映矿为后期叠加作用成因。反之,如果后期叠加不强烈,即使成矿元素丰度较高也难以成矿。因此,评价地层的含矿性应从成矿元素的相对富集与贫化、变化性以及后期作用叠加强度 3 个方面加以考虑(张松林等, 1995)。根据成矿元素后期作用叠加强度,变化性以及成矿元素的丰度这 3 个方面的相互关系,建立起区内地层元素成矿能力评序标准(表 10)。

根据卢镇关群和佛子岭群中地质异常指数(表 6)及其相对强弱(表 7、表 8、表 9)以及成矿元素成矿能力评序标准(表 10),得出卢镇关群和佛子岭群成矿元素成矿能力评序(表 11)。在表 11 中以得分 ≥ 3.5 划分优势矿种,小溪河组优势矿种包括 Mo、Ag、Cu;仙人冲组优势矿种包括 Mo、Fe、Ag;祥云寨组优势矿种包括 Mo、W、Cu;诸佛庵组优势矿种包括 Mo、W;潘家岭组优势矿种包括 Mo、W、Ag、Cu、Pb。综上所述,镇关群和佛子岭群主要优势矿种包括 Mo、Ag、W、Cu,而最优势的矿种为 Mo。钼的成矿主要通过 2 阶段富集过程来实现:一是与风化、沉积有关的表生过程,二是与板块俯冲或深熔有关的岩浆过

表 10 研究区内成矿元素成矿能力评序标准
Table 10 Standard of mineralization capability of the ore-forming elements in the study area

项目	K			D			CV		
	≥ 1.5	1.0~1.5	< 1.0	≥ 1.5	1.0~1.5	< 1.0	≥ 1.5	0.5~1.5	< 0.5
得分	2	1	0	2	1	0	2	1.5	1

程(孙卫东等, 2015)。因此,简单的岩浆过程难以直接成矿,富钼的岩浆源区是区内钼成矿必需的。基于 Hf 同位素和 Mo 元素丰度,刘晓强等(2017)认为大别造山带南侧的华南早古生代黑色页岩是北淮阳钼矿成矿岩浆岩的理想源区。而 Mo 元素在北淮阳基底卢镇关群和佛子岭群中存在明显富集和后期叠加,因此文章认为卢镇关群和佛子岭群更可能是北淮阳钼矿的理想矿源层,应该为区内钼矿提供了成矿物质。

5 成矿元素的控制因素

沉积岩中,不同的元素之间往往存在某些相关性,这些相关性可以作为元素或矿质来源的重要依据。一般来说,Al 和 Ti 主要为陆壳来源,当元素与 Al 和 Ti 的相关性好时,可以认为其主要来源于陆缘碎屑(Adachi et al., 1986; Yamamoto, 1987)。陆源碎屑岩中, Al_2O_3 和 SiO_2 是最主要成分,并且细碎屑岩多富集 Al_2O_3 ,粗碎屑岩富集 SiO_2 (Pettijohn et al., 1972)。碎屑岩中微量元素中的 V、Ni 及一些元素的比值(如 $V/(V+Ni)$)常常可以用来判断沉积时水体的氧化还原条件(李双应等, 1995; Hatcher et al., 1992),且这些值不易受到后期成岩作用的影响。因此,通过与这些元素的相关性研究还可以判断元素的富集是否受其沉积时水体的氧化还原状态的影响。此外,成岩作用往往会导致某些元素的丢失和另一些元素的增加,如钾化往往会导致 K 的增加和 Na 的降低(Fedo et al., 1995)。

通过对成矿元素的研究,卢镇关群和佛子岭群主要优势矿种为 Mo、Ag、W、Cu。因此,文章将重点

表 11 卢镇关群和佛子岭群成矿元素成矿能力评序表
Table 11 Score of mineralization capability of the ore-forming elements of Luzhenguan Group and Foziling Group

元 素	小溪河组		仙人冲组		祥云寨组		诸佛庵组		潘家岭组	
	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名
Ag	4.5	3	3.5	1	1.5	6	1.0	6	3.5	3
Cu	6.0	1	2.5	4	3.5	3	2.5	3	3.5	3
Pb	2.5	4	1.0	7	1.5	6	2.0	4	3.5	3
Zn	1.5	6	2.5	4	2.5	4	1.5	5	2.5	6
W	2.0	5	2.5	4	4.5	1	3.5	1	4.5	1
Mo	5.5	2	3.5	1	4.5	1	3.5	1	4.5	1
Fe	1.0	7	3.5	1	2.5	4	1.0	6	2.5	6

表 12 成矿元素与主量元素及特征指数之间的相关系数表
Table 12 Correlation coefficients between ore-forming elements and major elements and its characteristic indexes

对比项目	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	Fe
仙人冲组							
Al ₂ O ₃	0.894	0.891	0.577	0.759	0.862	-0.347	0.996
SiO ₂	0.880	0.341	0.981	0.407	0.428	-0.242	0.593
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	0.896	0.375	0.978	0.432	0.457	-0.251	0.624
V/(V+Ni)	0.660	0.677	0.536	0.288	0.658	-0.427	0.759
祥云寨组							
Al ₂ O ₃	-0.065	0.944	0.207	0.430	0.965	-0.791	0.893
SiO ₂	0.109	-0.968	-0.134	-0.357	-0.978	0.809	-0.859
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	0.141	-0.980	-0.078	-0.301	-0.981	0.818	-0.828
V/(V+Ni)	-0.494	0.768	-0.460	-0.258	0.817	-0.641	0.517
诸佛庵组							
Al ₂ O ₃	0.376	0.042	0.744	0.958	0.716	0.048	0.969
SiO ₂	-0.454	-0.073	-0.589	-0.798	-0.616	-0.110	-0.760
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	-0.447	-0.085	-0.412	-0.592	-0.471	-0.138	-0.526
V/(V+Ni)	0.150	0.412	-0.034	-0.130	0.180	0.295	-0.305
潘家岭组							
Al ₂ O ₃	0.192	0.375	0.713	0.935	0.276	-0.620	0.881
SiO ₂	-0.180	-0.326	0.009	-0.385	0.049	-0.551	-0.401
SiO ₂ +Al ₂ O ₃	-0.126	-0.222	0.233	-0.107	0.138	-0.767	-0.141
V/(V+Ni)	0.124	-0.031	0.336	0.138	0.353	0.104	0.039

考虑与相应的富集成矿元素有关的元素,并进一步讨论造成元素富集的原因。表 12 表明仙人冲组中 Ag 元素与 SiO₂+Al₂O₃ 正相关,相关系数 0.896,并与 SiO₂ 和 Al₂O₃ 正相关,反映了其受陆源碎屑控制;仙人冲组和祥云寨组中 Cu、W 与 Al₂O₃ 和 V/(V+Ni) 正相关,表明其受细碎屑岩控制并与还原的沉积环境密切相关;诸佛庵组中 Pb、Zn、W 和潘家岭组中 Pb、Zn 以及各组中 Fe 也受细碎屑岩控制,但受氧化还原环境影响较小。地层中其他元素的相对富集可能仅指示该区整体较高的背景值,而非陆源碎屑供给和氧化还原环境的影响作用。

6 结 论

(1)通过对卢镇关群和佛子岭群成矿元素富集系数(K)的分析,卢镇关群和佛子岭群各组中 Mo 均富集,成矿潜力巨大;而 W、Pb、Ag、Cu 也存在不同程度的富集,存在潜在成矿可能。卢镇关群和佛子岭群成矿元素后期叠加强度(D)表明本区的 Mo、Ag、Cu 等元素存在不同;卢镇关群和佛子岭群成矿元素后期叠加强度(D)表明本区的 Mo、Ag、Cu 等元素存在不同;卢镇关群和佛子岭群成矿元素后期叠加强度(D)表明本区的 Mo、Ag、Cu 等元素存在不同。

佛子岭群成矿元素变异系数(CV)反映了卢镇关群和佛子岭群总体受后期成矿作用不均匀叠加程度较弱。

(2)通过对卢镇关群和佛子岭群成矿能力评序得出本区最优势矿种为 Mo,并且卢镇关群和佛子岭群是北淮阳钼矿的理想矿源层,应该为区内钼矿提供了成矿物质。

(3)成矿元素与主微量元素的相关性分析表明仙人冲组和祥云寨组中 Cu 和 W 元素受细碎屑岩控制并与还原的沉积环境密切相关;仙人冲组中 Ag 和诸佛庵组中 Pb、Zn、W 和潘家岭组中 Pb、Zn 元素以及各组中 Fe 元素也受细碎屑岩控制,但受氧化还原环境影响较小;而地层中其他元素的相对富集可能仅仅指示该区整体较高的背景值,而非陆源碎屑供给和氧化还原环境的影响作用。

References

- Adachi M, Yamamoto K and Sugisaki R. 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific: Their

- geological significance as indication of ocean ridge activity[J]. *Sedimentary Geology*, 47: 125-148
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province. 1997. *Stratigraphy (Lithostratic) of Anhui Province*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 88-94 (in Chinese).
- Cheng Q M and Agterberg F P. 2009. Singularity analysis of ore-mineral toxic trace elements in stream sediments[J]. *Computers & Geosciences*, 35(2): 234-244.
- Dai L Q, Zhao Z F, Zheng Y F and Zhang J. 2012. The nature of orogenic lithospheric mantle: Geochemical constraints from post-collisional mafic-ultramafic rocks in the Dabie orogen[J]. *Chemical Geology*, 334(1): 99-121.
- Du J G and Zhang P. 1999. Mesozoic volcanic rocks in northern part of Dabie orogenic belt[J]. *Geoscience(Journal of Graduate School, China University of Geosciences)*, 13(1): 57-65(in Chinese with English abstract).
- Fan W M, Guo F, Wang Y J and Zhang M. 2004. Late Mesozoic volcanism in the northern Huaiyang tectono-magmatic belt, Central China: Partial melts from a lithospheric mantle with subducted continental crust relicts beneath the Dabie orogen[J]. *Chemical Geology*, 209(1-2): 27-48.
- Fedo C, Wayne N H and Young G. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23(10): 921-924.
- Gorelov D A. 1982. Quantitative characteristics of geological anomalies in assessing ore capacity[J]. *Internal Geology Review*, 24(4): 457-465.
- Hatch J R and Leventhal J S. 1992. Relationship between in ferried redox potential of the depositional environmental and geochemistry of the upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone Wabaunsee Country, Kansas, USA[J]. *Chemical Geology*, 99:65-82
- Huang H and Xue H M. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Early Cretaceous volcanic rocks from Jingangtai Formation in Beihuaiyang belt on the northern margin of the Dabie Orogen and their geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 371-381(in Chinese with English abstract).
- Jiang L L and Hu S Q. 2014. Metamorphic stratigraphic framework in the eastern part of the Dabie Mountain[J]. *Geology of Anhui*, 24(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Li C Y, Wang F Y, Hao X L, Ding X, Zhang H, Ling M X, Zhou J B, Li Y L, Fan W M and Sun W D. 2012. Formation of the world's largest molybdenum metallogenic belt: A plate-tectonic perspective on the Qinling molybdenum deposits[J]. *International Geology Review*, 54(9): 1093-1112.
- Li F L. 2011. Geological characteristics and metallogenic epoch of Qianechong large-size porphyry Mo deposit at the northern foot of Dabie Mountains, Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 457-468 (in Chinese with English abstract).
- Li S G, Xiao Y L, Liu D L, Chen Y Z, Ge N J, Zhang Z Q, Sun S S, Cong B L, Zhang R Y, Hart S and Wang S S. 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes[J]. *Chemical Geology*, 109(1): 89-111.
- Li S Y and Jin F Q. 1995. The V/(V+Ni) features of Permian Anoxic sediments in Lower Yangtze region[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 14(3):170-173(in Chinese).
- Li T and Ni S B. 1990. The elements abundance of earth and crust[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-20(in Chinese).
- Liang C and Zhu Y X. 2011. Metallogenic characteristics of gold and polymetallic in the South of Anhui Province[J]. *Gold Science and Technology*, 19(1): 21-27(in Chinese with English abstract).
- Liu X Q, Yan J and Wang A G. 2017. Characteristics and petrogenesis of Shapinggou ore-bearing porphyry in northern Huaiyang belt[J]. *Mineral Deposits*, 36(4): 837-865(in Chinese with English abstract).
- Lu S M, Xu X C and Peng Z. 2005. Geologic feature and genesis of crypto-explosion breccia in the east part of North Huaiyang tectonic zone[J]. *Geology and Prospecting*, 41(3): 7-11(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Pirajno F, Xiang J F, Gao J J, Ye H S, Li Y F and Guo B J. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings[J]. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 264-293.
- Peng S G, Lin Z Y, Hu J L and Liu J S. 2012. Regional metallogenic characteristics and ore prospecting outlook of Wudang-Tongbai-Dabie metallogenic belt[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28(3): 237-242 (in Chinese with English abstract).
- Peng Z. 2004. A review on fundamental geology in the eastern segment of northern Huaiyang Belt[J]. *Geology of Anhui*, 14(3): 172-176 (in Chinese with English abstract).
- Peng Z, Lu S M and Xu X C. 2005. Regional metallogenic regularity of gold-polymetallic deposits in the East of North Huaiyang tectonic belt[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 28(4): 364-368(in Chinese with English abstract).
- Pettijohn F J, Potter Paul E and Siever R. 1972. *Sand and sandstone*[M]. New York: Springer-Verlag. 213p.

- Qiu J Q. 2012. The characteristics of North Huaiyang metallogenic belt and its prospecting perspective[J]. *Mineral Deposits*, (S1): 31-32 (in Chinese).
- Regional Geological Survey Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province. 1985. Formation in Anhui: Archives of Pre-Cambrian[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House. 27 (in Chinese).
- Sun W D, Li C Y, Ling M X, Ding X, Yang X Y, Liang H Y, Zhang H and Fan Y M. 2015. The geochemical behavior of molybdenum and mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1807-1817 (in Chinese with English abstract).
- Tang Y J, Yin Q H and Yu C W. 1987. The idea and method for stratigraphic geochemistry[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 6 (3):126-128(in Chinese).
- Vistelius A B. 1960. The skew frequency distributions and the fundamental law of the geochemical processes[J]. *The Journal of Geology*, 68(1): 1-22.
- Wang G G, Ni P, Yu W, Chen H, Jiang L L, Wang B H, Zhang H D and Li P F. 2014. Petrogenesis of Early Cretaceous post-collisional granitoids at Shapinggou, Dabie Orogen: Implications for crustal architecture and porphyry Mo mineralization[J]. *Lithos*, 184-187 (Supplement C): 393-415.
- Wang G J, Zhang H D, Xiang B, Wang B H and Hao Y J. 2010. Mesozoic magmatism and polymetallic mineralization in the eastern part of the North Huaiyang tectonic zone[J]. *Geology of Anhui*, 20 (4): 267-272(in Chinese with English abstract).
- Wang X R, Li S X and Song R S. 2014. Geochemical features of amphibolites of the Luzhenguan Group complex and their relationship with origin of gold deposit in Xiaotian[J]. *Geology of Anhui*, 24 (1): 23-27(in Chinese with English abstract).
- Xia Q K, Zheng Y F and Deloufe E. 2003. U-Pb Ages and oxygen isotope compositions of zircons from post-collisional volcanic rocks of Dabieshan[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(2): 163-171(in Chinese with English abstract).
- Xie Z, Chen J F, Zhang X, Li H M, Zhou T X and Yang G. 2002. Geochronology of Neoproterozoic mafic intrusions in North Huaiyang area[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(6): 517-520(in Chinese with English abstract).
- Xu S T, Su W, Liu Y C, Jiang L L, Ji S Y, Okaya I and Sengör C. 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 256(5053): 80-82.
- Xu S T, Wu W P, Lu Y Q and Wang D H. 2010. Tectonic background of low grade metamorphic rocks of the Dabie Mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 795-810 (in Chinese with English abstract).
- Xu S T, Wu W P, Lu Y Q and Wang D H. 2012. Tectonic setting of the low-grade metamorphic rocks of the Dabie Orogen, Central eastern China[J]. *Journal of Structural Geology*, 37: 134-149.
- Yamamoto K. 1987. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shiman toterranes[J]. *Sedimentary Geology*, 52: 65-108.
- Yang Z Q. 2007. Re-Os isotopic ages of Tangjiaping molybdenum deposit in Shangcheng County, Henan and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(3): 289-295 (in Chinese with English abstract).
- Yin J N, Xing S W and Xiao K Y. 2016. Metallogenic Characteristics and mineral resource potential analysis of the Wudang-Tongbai-Dabie Mo-REE-Au-Ag-Pb-Zn metallogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(7):1447-1457 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Sun W D, Yang X Y, Liang H Y, Wang B H, Wang R L and Wang Y X. 2011. Geochronology and metallogenesis of the Shapinggou giant porphyry molybdenum deposit in the Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(12): 2039-2059(in Chinese with English abstract).
- Zhang H D, Wang B H, Hao Y J, Cheng S and Xiang B. 2012. Geological characteristics and comprehensive ore-prospecting information of Shapinggou porphyry-type molybdenum deposit in Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 31(1): 41-51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S L, Yuan X Y, Wu L D and Xiao D Z. 1995. Geochemical assessment of ore potentiality of the strata in Huzhou Changxing area, Zhejiang Province[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 16 (03): 31-43 (in Chinese with English abstract).
- Zhao H R, Du J G, Zhou C T, Chi Q H and Hu Z Q. 2015. The supracrust element abundance characteristics of the stratigraphic regions in Anhui Province[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 39(2):292-296 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P D and Meng X G. 1993. Geological anomaly and mineral prediction[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 18(1): 39-47(in Chinese with English abstract).
- Zhao P D and Xia Q L. 2009. Chinese scholars' achievements and contributions to the development of mathematical geosciences[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 225-231(in Chinese with English abstract).
- Zhao P D, Li G F and Zhang J C. 2012. Shale gas favorable blocks delineation and quantitative evaluation based on the geological anomaly theory: A case study of the lower Silurian Longmaxi Formation, the south eastern area of Chongqing[J]. *Natural Gas In-*

- dustry, 32(6): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Fu B, Gong B and Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogeny in China: Implications for geodynamics and fluid regime[J]. *Earth-Science Reviews*, 62(1-2): 105-161.
- Zuo R G, Cheng Q M, Agterberg F P and Xia Q L. 2009. Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3):225-235.
- ### 附中文参考文献
- 安徽省地质矿产局. 1997. 安徽省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 88-94.
- 安徽省地质矿产局区域地质调查队. 1985. 安徽省地层志-前寒武分册[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 27.
- 杜建国,张鹏. 1999. 大别造山带北部的中生代火山岩[J]. *现代地质*, 13(1):57-65.
- 黄皓,薛怀民. 2012. 北淮阳早白垩世金剛台组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(3):371-381.
- 江来利,胡召齐. 2014. 大别山东段的变质地层格架[J]. *安徽地质*, 24(1):1-6.
- 黎彤,倪守斌. 1990. 地球和地壳的元素丰度[M]. 北京:地质出版社. 1-20.
- 李法岭. 2011. 河南大别山北麓千鹅冲特大隐伏斑岩型钼矿床地质特征及成矿时代[J]. *矿床地质*, 30(3):457-468.
- 李双应,金福全. 1995. 下扬子地区二叠纪缺氧环境沉积物 V/(V+N_i)特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 14(3):170-173.
- 梁超,祝延修. 2011. 安徽省南部金、多金属成矿地质特征及找矿方向[J]. *黄金科学技术*, 19(1):21-27.
- 刘晓强,闫峻,王爱国. 2017. 北淮阳沙坪沟钼矿床成矿斑岩体特征与成因[J]. *矿床地质*, 36(04):837-865.
- 陆三明,徐晓春,彭智. 2005. 北淮阳构造带东段隐爆角砾岩型多金属矿床的地质特征及成因[J]. *地质与勘探*, 41(3):7-11.
- 彭三国,蔺志永,胡俊良,刘劲松. 2012. 武当-桐柏-大别成矿带区域成矿特征与找矿前景展望[J]. *华南地质与矿产*, 28(3):237-242.
- 彭智. 2004. 北淮阳东段基础地质评述[J]. *安徽地质*, 14(3):172-176.
- 彭智,陆三明,徐晓春. 2005. 北淮阳构造带东段金-多金属矿床区域成矿规律[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 28(4):364-368.
- 邱军强. 2012. 安徽北淮阳成矿带特征及找矿远景[J]. *矿床地质*, 31(S1):31-32.
- 孙卫东,李聪颖,凌明星,丁兴,杨晓勇,梁华英,张红,范蔚茗. 2015. 钼的地球化学性质与成矿[J]. *岩石学报*, 31(7):1807-1817.
- 唐元骏,殷庆和,於崇文. 1987. 地层地球化学研究的思想和方法[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 6(3):126-127
- 王根节,张怀东,项斌,王波华,郝越进. 2010. 北淮阳构造带东段中生代岩浆活动与多金属成矿作用[J]. *安徽地质*, 20(4):267-272.
- 王西荣,李绍侠,宋如晟. 2014. 晓天卢镇关岩群斜角闪岩类地球化学特征及其与金矿的成因关系[J]. *安徽地质*, 24(1):23-27.
- 夏群科,郑永飞,Deloule E. 2003. 大别山碰撞后火山岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成[J]. *高校地质学报*, 9(2):163-171.
- 谢智,陈江峰,张巽,李惠民,周泰禧,杨刚. 2002. 北淮阳新元古代基性侵入岩年代学初步研究[J]. *地球学报*, 23(6):517-520.
- 徐树桐,吴维平,陆益群,汪德华. 2010. 大别山低级变质岩的构造背景[J]. *地质通报*, 29(6):795-810.
- 杨泽强. 2007. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. *矿床地质*, 26(3):289-295.
- 阴江宁,邢树文,肖克炎. 2016. 武当-桐柏-大别 Mo-REE-Au-Ag-Pb-Zn 多金属成矿带主要地质成矿特征及资源潜力分析[J]. *地质学报*, 90(7):1447-1457.
- 张红,孙卫东,杨晓勇,梁华英,王波华,王瑞龙,王玉贤. 2011. 大别造山带沙坪沟特大型斑岩钼矿床年代学及成矿机理研究[J]. *地质学报*, 85(12):2039-2059.
- 张怀东,王波华,郝越进,程松,项斌. 2012. 安徽沙坪沟斑岩型钼矿床地质特征及综合找矿信息[J]. *矿床地质*, 31(1):41-51.
- 张鹏. 1998. 北淮阳地区中生代火山活动及其构造背景[J]. *安徽地质*, 8(03):12-17.
- 张松林,袁旭音,吴礼道,肖德彰. 1995. 浙江湖州—长兴地区地层含矿性的地球化学评价[J]. *火山地质与矿产*, 16(3):31-43.
- 赵华荣,杜建国,周存亭,迟清华,胡召齐. 2015. 安徽省域及地层区表壳元素丰度特征[J]. *物探与化探*, 39(2):292-296.
- 赵鹏大,孟宪国. 1993. 地质异常与矿产预测[J]. *地球科学*, 18(01):39-47.
- 赵鹏大,夏庆霖. 2009. 中国学者在数学地质学科发展中的成就与贡献[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 34(2):225-231.
- 赵鹏大,李桂范,张金川. 2012. 基于地质异常理论的页岩气有利区块圈定与定量评价——以渝东南地区下志留统龙马溪组为例[J]. *天然气工业*, 32(6):1-8.